

Title	自動運転システムの画像認識処理を対象とした形式仕様記述言語BBSLと機能テストの提案
Author(s)	田中, 健人
Citation	
Issue Date	2025-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/19972
Rights	
Description	Supervisor: 青木 利晃, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	田中 健人		
学 位 の 種 類	博士（情報科学）		
学 位 記 番 号	博情第 552 号		
学 位 授 与 年 月 日	令和 7 年 6 月 24 日		
論 文 題 目	自動運転システムの画像認識処理を対象とした形式仕様記述言語 BBSL と機能テストの提案		
論 文 審 査 委 員	青木 利晃	北陸先端科学技術大学院大学	教授
	平石 邦彦	同	教授
	富田 堯	同	准教授
	岡野 浩三	信州大学	教授
	野口 秀人	日立製作所	主管研究長

論文の内容の要旨

Automated driving systems (ADSs) are complex entities comprising numerous components, and traditional testing methods often struggle to ensure their safety, primarily due to the diversity driving environments. Among the core components of ADSs, object detection using deep neural networks (DNNs) has shown remarkable effectiveness in recognizing surrounding vehicles, pedestrians, and obstacles. However, ensuring the safety of object detection in such systems requires more than just high detection performance—it requires the ability to verify whether the positions of detected objects comply with safety-relevant specifications that govern system responses. Unfortunately, current testing practices are often grounded in informal specifications, which lack the precision and rigor needed to validate object-detection behaviors, particularly in safety-critical contexts. These informal descriptions make it difficult to define expected behavior and judge whether a system has passed or failed a given test. To address this issue, this paper first propose the bounding box specification language (BBSL), a framework capable of mathematically articulating the specifications for object and event detection and response (OEDR) tasks in ADSs. BBSL enables stakeholders such as developers and testers to mathematically express requirements concerning object positions and their relationships in a highly interpretable and verifiable manner. Building on this language, we further propose a functional testing approach for object- detection modules in ADSs. This approach leverages BBSL to define the expected behaviors in a testable form and allows us to determine whether the system ’s object recognition results satisfy these function. Notably, our approach can identify safety-critical defects that may remain undetected by conventional testing methods that rely solely on performance metrics such as accuracy or Intersection over Union (IoU). Furthermore, our proposed approach can identify safety-critical defects that conventional tests, which focus solely on performance evaluation, might overlook. Furthermore, we propose two sets of test criteria. The first set reflects the diversity of object positions and sizes within an image, while the second set includes coverage metrics that determine whether the test cases cover all conditions outlined by the BBSL specifications. Overall, our contributions facilitate the

implementation of functional testing for object-detection systems using DNNs, a challenge previously considered formidable.

Keywords— Automated driving, coverage, formal specification, object detection, testing

論文審査の結果の要旨

本博士論文では、自動運転システムにおける物体認識システムを対象とし、その仕様を記述するための形式仕様記述言語と、それに基づくテスト手法を提案している。現在、近未来における完全自動運転の実現は全世界的な関心事である一方で、その安全性や品質をいかに保証するかが大きな課題となっている。自動運転システムでは、機械学習をはじめとするいわゆる AI 技術が活用されているが、AI の処理過程はブラックボックスであり、その信頼性や安全性を保証するための体系的な検証手法は、いまだ十分に確立されていないのが現状である。そこで本研究では、機械学習を用いた自動運転システムの中でも、物体認識システムに焦点を当て、その品質保証に向けた一つのアプローチを提案している。物体認識システムは、入力に対する期待される出力を定義するのが困難であるというオラクル問題を抱えている。従来は、メタモルフィックテストやニューラルネットワーク内部構造に基づくカバレッジ手法など、オラクルを直接定義せずに信頼性を評価する手法が主流であった。これに対して本研究では、オラクルを明示的に仕様として記述するというアプローチを採る。AI に対する仕様記述の困難さとその重要性は、近年の関連研究でも指摘されており、本研究はその課題への挑戦である。物体認識システムは、画像を入力とし、そこに含まれる物体の種類と位置を出力するシステムである。このようなシステムの仕様を定義するには、画像に対する制約や条件を形式的に表現する必要がある。本研究では、物体認識において一般的に用いられる Bounding Box (BB) に注目し、BB 間の空間的関係を明確に記述する形式仕様言語 BBSL (Bounding Box Specification Language) を提案した。従来の形式仕様言語である Z や VDM は集合や関係に基づいており、従来型システムの仕様記述には適しているが、物体認識システムのように複雑な入出力を扱うには不十分である。一方、物体の空間関係に着目した研究分野として定性空間推論があり、その中でも RCC (Region Connection Calculus) などの理論が地図情報の形式記述に応用されている。本研究は、これらとは異なり、BB に注目し、距離や比率といった、自動運転における物体認識で重要となる概念を仕様言語に導入した点において新規性と独創性がある。

また、米国 NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) が規定するレーンキープ支援システムの品質評価ガイドラインに基づき、提案仕様言語の表現能力や実用性について評価を行い、一定の有効性を確認した。さらに、提案した BBSL を活用し、物体認識システムのテスト手法を提案した。この手法では、正解ラベル付きのデータセットを用いて、仕様に基いて定義された期待動作と、物体認識システムによる検出結果とを照合することで、仕様への適合性を評価する。加えて、テストにおけるカバレッジ指標として、プログラムの構造カバレッジを参考に、BBSL における構造カバレッジを定義した。本手法を用いて、物体検出アルゴリズムである YOLO を対象に、自動運转向けのオープンデータセットである KITTI を用いた実験を実施した。その結果、テストの合格率やカバレッジの計測に成功し、テストが網羅できていないケースの検出にも有効であることを確認した。

以上、自動運転システムにおける物体認識システムを対象とした形式仕様記述言語、および、それに基づいたテスト手法を提案したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士(情報科学)の学位論文として十分価値があるものと認めた。